Iranian Journal of Pulses Research
Vol. 16, No. 1, June 2025, pp. 177-191

Original Research
Homepage: https://ijpr.um.ac.ir

https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.92906.1109

Investigating the Response of Rainfed Chickpea (*Cicer arietinum* L.) to Different Nitrogen Fertilizer Levels in Cold Regions

Yaser Azimzadeh[1]*, Arash Mohammadzadeh[1], Hamid Hasanian Khoshroo[2], Gholamreza Ghahramanian[1]

Received: 07-04-2025
Revised: 12-05-2025
Accepted: 20-05-2025
Available Online: 20-05-2025

Cite this article:
Azimzadeh, Y., Mohammadzadeh, A., Hasanian Khoshroo, H., & Ghahramanian, G. (2025). Investigating the response of rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) to different nitrogen fertilizer levels in cold regions. *Iranian Journal of Pulses Research*, *16*(1), 177-191. (in Persian with English Abstract). https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.92906.1109

Introduction
Chickpea (*Cicer arietinum* L.), a key legume of the Fabaceae family, is cultivated as a winter or spring crop, primarily under rainfed conditions, in western and northwestern of Iran. To position chickpea as a viable alternative in cereal-based rotations and enhance its contribution to sustainable agriculture, agronomic practices—especially nutrient management—must be thoroughly optimized and studied. Nitrogen (N), the most critical macronutrient for plant growth and yield enhancement, is required in greater quantities than any other element. While chickpea fulfills much of its nitrogen demand via biological nitrogen fixation (BNF), a minimal "starter" N dose is essential to ensure robust seedling establishment and meet early growth requirements before effective rhizobial symbiosis is achieved. Precise determination of starter N for rainfed chickpea is critical, as excessive application increases costs, risks environmental contamination, and suppresses yields, whereas insufficient doses compromise productivity.

Materials and Methods
A randomized complete block design (RCBD) with three replications was employed during the 2022–2023 growing season to evaluate the N requirements of rainfed chickpea (cv. Ana) under cold rainfed conditions in Bukan (autumn sowing) and Maragheh (autumn and spring sowing). Treatments included five urea levels: 0, 25, 50, 75, and 100 kg ha^{-1}. Following reduced tillage (using a combination tillage implement), chickpea seeds were sown at 40 seeds m^{-2}. Autumn sowing occurred in October 2023, and spring sowing in late February 2024, using an ASKE 3-shank 11-row planter with 53–17 cm row spacing. Experimental plots measured 10 × 30 m. Urea was applied via subsurface banding (5–6 cm below seeds) at sowing. Measured parameters included root traits (length, volume, dry weight, nodule weight), plant height, 100-seed weight, biological yield, grain yield, harvest index, and rainwater use efficiency.

Results and Discussion
Environmental effects significantly influenced root length, nodule weight, root volume, dry weight, plant height, biological yield, grain yield, rainwater use efficiency ($p \leq 0.01$), and 100-seed weight ($p \leq 0.05$). Nitrogen levels significantly affected all parameters ($p \leq 0.01$), except 100-seed weight ($p \leq 0.05$). Autumn-sown Bukan exhibited superior root traits, plant height, and yields compared to Maragheh. Root length, volume, and dry weight declined with increasing N, likely due to restricted root growth from urea banding at higher doses. Enhanced nodulation in Bukan may reflect its soil's native rhizobia populations, as Maragheh lacks prior legume cultivation. Elevated soil fertility and favorable climatic conditions in Bukan further supported root development. Excessive mineral N inhibited rhizobial symbiosis, reducing nodule weight. Plant height and 100-grain weight peaked at 50 kg ha^{-1} N in Bukan (57 cm, 6 cm above control). In autumn-sown Bukan, grain yield plateaued at 25 kg ha^{-1} N, while Maragheh achieved maxima at 75 kg ha^{-1} (autumn) and 50 kg ha^{-1} (spring). The highest harvest index (48%) occurred at 50 kg ha^{-1} N in spring-sown Maragheh. Starter N bolstered early growth and photosynthetic capacity, enhancing yields. Moderate N optimized harvest index by favoring grain over biomass allocation. Rainwater use efficiency (RUE) was higher in autumn-sown chickpea

1- Natural Resources Management Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran
2- Food Legume Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran
* Corresponding Author: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

in Bukan compared to both autumn- and spring-sown crops in Maragheh. Furthermore, RUE initially increased with rising nitrogen application rates but declined at elevated doses. Regression analysis of grain yield against urea application rates revealed maximum achievable yields of 1535 and 940 kg ha^{-1} for autumn-sown rainfed chickpea in Bukan and Maragheh, respectively. To attain these yields, starter urea doses of 62 and 61 kg ha^{-1} were required for Bukan and Maragheh. For spring-sown chickpea in Maragheh, the peak grain yield was 835 kg ha^{-1}, achievable with a urea input of 43 kg ha^{-1}. The minimal urea requirements for maximizing net economic returns were 60 kg ha^{-1} for autumn-sown chickpea in both regions, whereas spring-sown systems in Maragheh required 42 kg ha^{-1}. Simple correlation analyses between grain yield and yield components demonstrated that grain yield showed the strongest positive correlations with biological yield, plant height, and root dry weight, in descending order of magnitude. Similarly, rainwater use efficiency exhibited the highest positive correlations with grain yield, biological yield, and plant height, respectively. The robust correlations between grain yield and these traits suggest that these parameters likely exert direct influences on grain yield.

Conclusions
Excessive nitrogen fertilization leads to salinity, toxicity, and disruption of symbiotic relationships, offsetting potential yield benefits. A minimal starter dose of 42 kg ha^{-1} urea is sufficient for spring-sown chickpea, while 60 kg ha^{-1} urea maximizes economic returns in autumn-sown systems. Precision in N management is critical to balance productivity, sustainability, and environmental stewardship in rainfed chickpea cultivation.

Keywords: Biological fixation, Nutritional requirement, Starter fertilizer

نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران
جلد ۱۶، شمارهٔ ۱، نیمهٔ اول ۱۴۰۴، ص. ۱۹۱-۱۷۷

نوع مقاله: پژوهشی
Homepage: https://ijpr.um.ac.ir

https://doi.org/10.22067/ijpr.2025.92906.1109

بررسی پاسخ نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم به سطوح مختلف کود نیتروژن در مناطق سردسیر

یاسر عظیم‌زاده[1]*، آرش محمدزاده[1]، حمید حسنیان خوشرو[2]، غلامرضا قهرمانیان[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

چکیده

به‌منظور تعیین نیاز نیتروژنی نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم (رقم آنا) در تناوب با گندم در شرایط دیم سردسیر، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان بوکان (کشت پاییزی) و شهرستان مراغه (کشت پاییزی و بهاره) در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا شد. کشت پاییزی در بوکان، کشت پاییزی در مراغه و کشت بهاره در مراغه به عنوان محیط‌های آزمایش در نظر گرفته شدند و تجزیه داده‌های حاصل از این محیط‌ها با استفاده از روش تجزیه مرکب انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل پنج سطح نیتروژن صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار بود. صفات مورد مطالعه شامل طول ریشه، حجم ریشه، وزن ریشه خشک، وزن گره‌های ریشه، ارتفاع بوته، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب باران بود. نتایج نشان داد که اثر محیط بر طول ریشه، وزن گره‌های ریشه، حجم ریشه، وزن ریشه خشک، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب باران در سطح یک درصد ($p\leq0.01$) و بر وزن ۱۰۰ دانه در سطح پنج درصد ($p\leq0.05$) معنی‌دار بود. همچنین اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر وزن ۱۰۰ دانه در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر متغیرهای مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. طول، حجم و وزن گره‌های ریشه، وزن ریشه خشک، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی و عملکرد دانه در کشت پاییزی بوکان به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشت بهاره و پاییزی مراغه بود. علاوه‌بر این، طول و حجم ریشه و وزن ریشه خشک گیاه با افزایش سطح کود نیتروژن کاهش یافت. با افزایش سطح کود نیتروژن، ارتفاع بوته و وزن ۱۰۰ دانه ابتدا افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک حد بیشینه، دوباره کاهش یافت. برای دستیابی به بیشترین سود اقتصادی حاصل از کشت پاییزه نخود دیم (رقم آنا) در بوکان و مراغه، استفاده از ۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار و برای کشت بهاره نخود مقدار ۴۲ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان کود آغازگر توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تثبیت زیستی، کود استارتر، نیاز غذایی

مقدمه

حبوبات از جمله نخود (*Cicer arietinum* L.) جزء اصلی‌ترین محصولات جایگزین در نظام تناوبی با غلات دیم و جزء اولویت‌های نظام برنامه‌ریزی کشاورزی کشور بوده و در جیره غذایی مردم از اهمیت بالایی برخوردار هستند. نخود در مناطق غرب و شمال غرب ایران به‌عنوان یک گیاه پاییزه یا بهاره و غالباً به‌صورت دیم کشت شده و با استفاده از رطوبت ذخیره‌شده در خاک، چرخه زیستی خود را تکمیل می‌کند (Sabaghpour et al., 2006). نخود به‌دلیل برخورداری از مقادیر زیاد پروتئین، توانایی تثبیت زیستی نیتروژن، امکان قرارگیری در تناوب زراعی با سایر گیاهان از جمله غلات، امکان کشت به‌صورت دیم حتی در اراضی کم‌بازده، غنی بودن از آنتی‌اکسیدان‌ها و عناصر غذایی معدنی نظیر فسفر و کلسیم و قابلیت نگهداری و انبارداری بالای بذر، از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در بین حبوبات برخوردار است. ایران از نظر سطح زیر کشت نخود، چهارمین رتبه را بعد از هند، پاکستان و ترکیه دارد (Sabaghpour et al., 2006)، امّا عملکرد نخود در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور تحت شرایط دیم، به دلایل مختلفی از جمله کمبود مواد آلی خاک، ناکافی بودن نزولات آسمانی، حاصلخیزی پایین خاک و عدم مدیریت مصرف کود، پایین است.

برای اینکه نخود به‌عنوان یک گیاه جایگزین در تناوب با غلات مورد استقبال کشاورزان قرار گرفته و جایگاه خود را در نظام تولید پایدار کشاورزی بیابد، مستلزم بررسی و تعیین دقیق

۱- بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران
۲- بخش تحقیقات حبوبات، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران
(*- نویسنده مسئول: y.azimzadeh@areeo.ac.ir)

اصول به‌زراعی از جمله مدیریت بهینه کودی می‌باشد. نیتروژن پرمصرف‌ترین و ضروری‌ترین عنصر غذایی برای رشد و افزایش عملکرد گیاهان زراعی محسوب می‌شود که بیش از هر عنصر دیگری عامل محدودکننده رشد است، امّا ریشه گیاه نخود به‌واسطه ایجاد رابطه همزیستی با باکتری‌های *ریزوبیوم* می‌تواند نیتروژن مولکولی هوا را در خاک تثبیت و بخش زیادی از نیاز نیتروژنی خود را از این طریق برطرف نماید. بااین‌حال، برای استقرار بهتر گیاهچه‌ها در خاک و تأمین نیاز نیتروژنی گیاه تا زمان برقراری ارتباط ریزوبیومی در سامانه ریشه–خاک، نیاز به مقداری کود نیتروژنی به‌عنوان «آغازگر» دارد (Amiri et al., 2015). تعیین مقدار دقیق نیتروژن آغازگر برای نخود دیم اهمیت زیادی دارد، زیرا مقادیر زیاد سبب تحمیل هزینه‌های اضافی، آلودگی محیط زیست و کاهش عملکرد می‌شود و مقادیر کم منجر به عملکرد مطلوب نخواهد شد. در مناطق گرم و خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود مواد آلی ناشی از تجزیه سریع و فقدان بقایای گیاهی، کمبود نیتروژن شایع‌تر است. از طرفی، کشت در خاک‌های با ماده آلی و نیتروژن کم، ممکن است پاسخگوی نیاز گیاه به نیتروژن تثبیت‌شده به‌وسیله باکتری نباشد. در چنین شرایطی، مصرف کود نیتروژن آغازگر به‌مقدار مناسب و در زمان مناسب، موجب بهبود فرآیندهای توسعه ریشه و تشکیل گره و فعالیت بالای باکتری‌های جنس *ریزوبیوم* در گیاه میزبان می‌شود (Namvar et al., 2011). در این رابطه، والی و همکاران (Walley et al., 2005) با بررسی اثر سطوح مختلف نیتروژن (صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ کیلوگرم در هکتار) بر تثبیت زیستی نیتروژن در نخود، اظهار کردند که میزان تثبیت زیستی نیتروژن توسط ریشه نخود در مقادیر کم نیتروژن (۱۵ تا ۳۰ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از مقادیر زیاد نیتروژن (۳۰ تا ۴۵ کیلوگرم در هکتار) بود. امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) گزارش کردند که در شرایط آبیاری کامل، بیشترین عملکرد دانه نخود با مصرف ۳۰ و ۷۵ کیلوگرم اوره در هکتار حاصل شد، درحالی‌که کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. رفتاری و همکاران (Raftari et al., 2024) بیشترین و کمترین عملکرد نخود را به‌ترتیب از کاربرد ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار و عدم کاربرد کود به دست آوردند. در پژوهشی دیگر، کاربرد کود نیتروژن با افزایش سطح برگ و میزان آسیمیلاسیون خالص، تجمع ماده خشک و عملکرد دانه نخود را افزایش داد (Hassanpoor, 2023). ملکی و همکاران (Malaki et al., 2021) گزارش کردند که کاربرد ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، وزن دانه در بوته و شاخص برداشت نخود شد. طلیعی و صیادیان (Tallie & Sayadyan, 2000) مقدار ۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار را برای افزایش عملکرد نخود دیم در منطقه سرارود کرمانشاه توصیه کردند.

مینا و همکاران (Meena et al., 2020) گزارش کردند که عملکرد نخود در شرایط دیم، ۶۰ درصد عملکرد در شرایط آبیاری بود، بااین‌حال، کاربرد ۳۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، عملکرد نخود دیم را از ۶۰ به ۹۰ درصد عملکرد شرایط آبیاری افزایش داد که نشان می‌دهد کاربرد متعادل نیتروژن می‌تولند تنش خشکی را در نخود تعدیل نماید. نامور و همکاران (Namvar et al., 2011) نشان دادند که کاربرد کود اوره به‌میزان ۷۵ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با سطوح صفر و ۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، تجمع ماده خشک و در نهایت عملکرد نخود را افزایش داد. داشادی و رسایی (Dashadi & Rasaei, 2020) بیشترین عملکرد نخود دیم در منطقه کرمانشاه را با کاربرد ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آوردند و گزارش کردند که عملکرد دانه در دو سطح ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت. در مورد نیاز نیتروژنی پایه نخود دیم در مناطق اقلیمی سردسیر پژوهش چندانی انجام نشده و اطلاعات دقیق و جامعی در این رابطه در دسترس نیست. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف کود اوره بر عملکرد و اجزای عملکرد نخود و تعیین نیاز نیتروژنی و توصیه کودی آن در کشت بهاره و پاییزی در دو منطقه بوکان و مراغه انجام شد.

مواد و روش‌ها

به این منظور، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان بوکان (کشت پاییزی) و شهرستان مراغه (کشت پاییزی و بهاره) در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در شرایط دیم اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل پنج سطح نیتروژن صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود اوره بود. کشت پاییزی در بوکان، کشت پاییزی در مراغه و کشت بهاره در مراغه به عنوان سه محیط مختلف در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها براساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی و به روش تجزیه مرکب انجام شد. قبل از اجرای آزمایش به‌منظور اطلاع از ویژگی‌های اولیه خاک محل اجرای آزمایش و ارائه توصیه کودی لازم، نمونه خاکی به‌روش مرکب از عمق ۲۵-۰ سانتی‌متری از محل‌های اجرای آزمایش تهیه و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی خاک از جمله بافت خاک به‌روش هیدرومتری، کلسیم کربنات معادل به‌روش خنثی‌سازی با اسید و تیترکردن با سود، کربن آلی به‌روش اکسایش تر (والکلی بلک)، فسفر قابل استفاده به‌روش اولسن و

پتاسیم قابل استفاده به‌روش آمونیوم استات تجزیه و تعیین شد (Dane & Topp, 2020; Sparks et al., 2020). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک برداشت‌شده از دو مزرعه مورد مطالعه در جدول ۱ و داده‌های هواشناسی منطقه بوکان و مراغه در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به اینکه پتاسیم قابل استفاده هر دو خاک مورد مطالعه بیشتر از حد بحرانی بود (جدول ۱)، نیازی به مصرف کود پتاسیم نبود، بااین‌حال فسفر قابل استفاده خاک مزرعه مورد مطالعه در مراغه کمتر از حد بحرانی (شش میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۱).

بنابراین، قبل از کاشت، مقدار ۳۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل مورد استفاده قرار گرفت. میانگین دمای هوا در سال اجرای آزمایش در مراغه و بوکان به‌ترتیب برابر ۷/۲ و ۸/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بلندمدت به‌ترتیب برابر ۷/۰ و ۶/۱ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین مجموع بارش در مراغه و بوکان به‌ترتیب برابر ۳۸۱/۴ و ۲۸۹/۰ میلی‌متر و میانگین بلندمدت به‌ترتیب برابر ۳۶۱/۰ و ۳۱۰/۹ میلی‌متر بود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد مطالعه

Table 1- Some physical and chemical properties of the studied farm soils

نمونه خاک Soil sample	بافت Texture	اسیدیته pH	فسفر قابل استفاده Available P (میلی‌گرم بر کیلوگرم) (mg.kg^{-1})	پتاسیم قابل استفاده Available K (میلی‌گرم بر کیلوگرم) (mg.kg^{-1})	مواد خنثی شونده TNV (درصد) (%)	کربن آلی Organic C (درصد) (%)	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC_e (dS.m^{-1})
مراغه Maragheh	Clay loam	7.81	4	305	9	0.6	0.721
بوکان Bukan	Silty loam	7.57	10	320	13	1.1	0.968

TNV: ارزش خنثی‌سازی کل

TNV: Total neutralizing value

جدول ۲- میانگین دما و بارندگی منطقه مراغه و بوکان در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲

Table 2- Mean temperature and precipitation data of Maragheh and Bukan regions during the 2023-2024 growing season

	میانگین دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) Mean temperature (°C)		مجموع بارش (میلی‌متر) Cumulative precipitation (mm)	
	فصل زراعی	میانگین بلندمدت	فصل زراعی	میانگین بلندمدت
مراغه Maragheh	7.2	7	381.4	361
بوکان Bukan	8.8	6.1	289	310.9

بعد از آماده‌سازی زمین به‌روش کم‌خاکورزی (خاکورز مرکب)، بذر نخود رقم آنا با تراکم ۴۰ عدد بذر در هر مترمربع به‌صورت پاییزه در آبان ماه ۱۴۰۲ و به‌صورت بهاره در اواخر اسفند ۱۴۰۲ توسط کارنده آسکه سه محوره ۱۱ ردیفه با آرایش کشت ۵۳-۱۷ سانتی‌متر به‌صورت دیم کشت شد. ابعاد هر یک از کرت‌ها ۱۰ در ۳۰ متر بود. کود نیتروژن از منبع اوره در مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کشت و به‌صورت جایگذاری در پنج تا شش سانتی‌متری زیر بذر مصرف شد. برای مبارزه با کرم طوقه‌بر (*آگروتیس*) از سم دیازینون استفاده شد و مبارزه با علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ به‌روش وجین دستی انجام شد. صفات مورد مطالعه شامل طول ریشه، حجم ریشه، وزن ریشه خشک، وزن گره‌های ریشه، ارتفاع بوته، وزن ۱۰۰ دانه، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب باران بود. طول ریشه با استفاده از خط‌کش و حجم ریشه توسط استوانه مدرج (قانون ارشمیدس) برحسب سانتی‌مترمکعب اندازه‌گیری شد. بهره‌وری آب باران نشان می‌دهد که به‌ازای هر میلی‌متر آب باران، چند کیلوگرم دانه تولید شده است. در زمان برداشت محصول و یادداشت‌برداری‌ها، ردیف‌های کناری هر کرت به‌عنوان اثر حاشیه‌ای در نظر گرفته شد و اندازه‌گیری صفات و نمونه‌برداری

با حذف ۵۰ سانتی‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت، از ردیف‌های میانی انجام شد. در طول دوره داشت، برداشت محصول در بوکان و کشت پاییزه مراغه هشت ماه پس از کاشت و در کشت بهاره مراغه چهار ماه پس از کاشت و به‌صورت دستی انجام شد.

داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ویرایش ۹/۴ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

آزمون بارتلت برای ارزیابی همگنی واریانس خطاهای آزمایشی انجام شد و فرض صفر مبنی بر عدم وجود اختلاف معنی دار بین واریانس‌های خطاها در آزمایش‌های جداگانه تأیید شد. در این آزمون، مقدار کای‌اسکوئر برای عملکرد دانه ۰/۵۹ و مقدار آلفا ۰/۷۴به دست آمد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر محیط بر طول ریشه، وزن گره‌های ریشه، حجم ریشه، وزن ریشه خشک، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و بهره‌وری آب باران در سطح یک درصد ($p≤۰/۰۱$) و بر وزن ۱۰۰ دانه در سطح پنج درصد ($p≤۰/۰۵$) معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر وزن ۱۰۰ دانه در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر مشخصه‌های مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین برهم‌کنش محیط و کود نیتروژن بر وزن ۱۰۰ دانه اثر معنی‌دار نداشت، امّا اثر آن بر وزن ریشه خشک و ارتفاع بوته در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر ویژگی‌های مورد بررسی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۳).

طول ریشه

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که طول ریشه در کشت پاییزی بوکان به‌طور معنی‌داری بیشتر از طول ریشه در کشت بهاره و پاییزی مراغه بود و در مراغه، طول ریشه در کشت پاییزی کمی بیشتر از کشت بهاره بود، هرچند که از نظر آماری تفاوت چندانی بین آن‌ها مشاهده نشد. همچنین کاربرد مقادیر زیاد کود نیتروژن باعث کاهش طول ریشه شد (جدول ۴). با توجه به اینکه کود اوره به‌صورت جایگذاری در زیر بستر بذر مورد استفاده قرار گرفت، احتمالاً مصرف زیاد کود اوره، با تحریک و تقویت رشد رویشی اندام هوایی، رقابت بین ریشه و لندام هوایی در توزیع مواد فتوسنتزی را افزایش داده و باعث برتری اندام هوایی در مصرف فرآورده‌های فتوسنتزی[1] شده است. شارما و همکاران (Sharma et al., 2017) نشان دادند که مصرف ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، عمق ریشه نخود دیم را از ۴۵ به ۶۰ سانتی‌متر افزایش داده و جذب آب را به‌میزان ۲۰-۱۵ درصد بهبود داد.

وزن گره

وزن گره در کشت پاییزی بوکان بیشتر از کشت پاییزی مراغه و در آن بیشتر از کشت بهاره مراغه بود. همچنین با افزایش سطح کود نیتروژن در هر سه محیط، روند کاهشی در وزن گره مشاهده شد، به‌طوری‌که بیشترین وزن گره در سطح صفر نیتروژن کشت پاییزی بوکان مشاهده شد (جدول ۴). گره‌های مؤثر ریشه نشان‌دهنده تثبیت زیستی نیتروژن توسط ریشه گیاه بوده و هر چه تعداد این گره‌ها بیشتر باشد، میزان نیتروژن تثبیت‌شده و در نتیجه، تغذیه نیتروژنی گیاه بهبود می‌یابد. میزان نیتروژنی که از طریق تثبیت زیستی در اختیار گیاه قرار داده می‌شود به‌علت اینکه به‌طور مستمر و مداوم و از مسیر کوتاه به مصرف گیاه می‌رسد، کارآیی بیشتری برای گیاه دارد. بنابراین، با توجه به نتایج، بوته‌های نخود در منطقه بوکان دارای گره‌های بیشتری بوده و تثبیت بیشتری انجام داده‌اند و احتمالاً یکی از علت‌های ارتفاع بوته و عملکرد بیشتر در منطقه بوکان نسبت به مراغه، همین گره‌ها بوده است. یکی از علت‌های گره‌های بیشتر در بوکان نسبت به مراغه احتمالاً به ریزوبیوم‌های بومی بیشتر در خاک مزرعه بوکان می‌باشد، زیرا مزرعه مورد مطالعه در کشت پاییزی و بهاره مراغه سابقه کشت حبوبات نداشت، ولی در مزرعه بوکان، به‌طور مداوم نخود در تناوب با گندم کشت می‌شود. نیتروژن معدنی زیاد در خاک بر ایجاد رابطه همزیستی گیاه با *ریزوبیوم‌ها* اثر منفی داشت. هر چه میزان نیتروژن معدنی در دسترس ریشه در خاک افزایش یابد، گیاه تمایل کمتری به ایجاد رابطه همزیستی خواهد داشت. رانا و همکاران (Rana et al., 2021) گزارش کردند که مصرف ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، فعالیت آنزیم‌های خاک (مانند دهیدروژناز) را تا ۳۵ درصد افزایش داد، امّا سطوح بالای نیتروژن (۶۰ کیلوگرم در هکتار)، تنوع میکروبی خاک را تا ۲۰ درصد کاهش داد. باتاچاریا و همکاران (Bhattacharyya et al., 2020) نیز گزارش کردند که کاربرد متعادل نیتروژن (۴۰ کیلوگرم در هکتار) جمعیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن (*ریزوبیوم‌ها*) را تا ۴۰ درصد افزایش داد.

1- Assimilate

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری نخود دیم در سه محیط

Table 3- Combined analysis of variance of different nitrogen fertilizer effects on yield, yield components, and productivity indices of rainfed chickpea in three environments

منابع تغییر S.O.V	درجه ازادی df	حجم ریشه Root volume	وزن گره ریشه Root nod weight	طول ریشه Root length	وزن ریشه خشک Root dry weight	ارتفاع بوته Plant height
		میانگین مربعات Mean of squares				
محیط Environment (E)	2	97.7 **	15 **	2344 **	6 **	346.5 **
محیط (بلوک) Environment (Block)	6	0.04	0.02	3.75	0.02	2.7
نیتروژن Nitrogen (N)	4	2.27 **	2.39 **	140 **	0.27 **	21.6 **
محیط × نیتروژن E × N	8	0.79 **	0.26 **	54 **	0.06 *	7.08 *
خطا Error	24	0.14	0.02	4.76	0.02	2.32
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		8.1	8.4	6.4	8.7	3.24

ادامه جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری نخود دیم در سه محیط

Table 3- Combined analysis of variance of different nitrogen fertilizer effects on yield, yield components, and productivity indices of rainfed chickpea in three environments, continued

منابع تغییر S.O.V	درجه ازادی df	بهره‌وری آب باران Rainwater productivity	شاخص برداشت Harvest index	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیستی Biological yield	وزن ۱۰۰ دانه Weight of one hundred grains
		میانگین مربعات Mean of squares				
محیط Environment (E)	2	14.92 **	3.8	599175 **	1405419 **	3.5 *
محیط (بلوک) Environment (Block)	6	0.06	5 *	9606	39998	0.58
نیتروژن Nitrogen (N)	4	0.56 **	53.8 **	83605 **	403818 **	4.43 *
محیط×نیتروژن E × N	8	0.18 **	11.22 **	25655 **	107137 **	1.76
خطا Error	24	0.04	1.94	6243	20301	1.33
ضریب تغییرات (درصد) (٪) CV		8.0	3.2	7.9	6.2	3.3

*و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

* and **: Significant at 5 and 1% probability levels, respectively

حجم و وزن ریشه خشک

حجم ریشه و به‌تبع آن، وزن ریشه خشک، در کشت پاییزی بوکان بیشتر از کشت پاییزی و بهاره مراغه بود. مصرف مقادیر زیاد کود نیتروژن در کشت پاییزی بوکان و مراغه منجر به کاهش حجم و وزن خشک ریشه شد. با توجه به یکسان بودن نهاده‌ها و مراحل کاشت، داشت و برداشت محصول در سه محیط مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که بیشتر بودن طول، حجم و وزن ریشه خشک و وزن گره‌ها در کشت پاییزی بوکان نسبت به مراغه ممکن است به‌علت حاصلخیزی بیشتر خاک مزرعه بوکان و اقلیم آن محیط باشد. خاک منطقه بوکان با بافت متوسط، دارای pH کمتر و ماده آلی و همچنین فسفر و پتاسیم

قابل استفاده بیشتری نسبت به مراغه بود (جدول ۱). بنابراین، از حاصلخیزی بیشتری برخوردار بود. علاوه‌بر آن، به‌طور مداوم تحت تناوب گندم-نخود قرار داشت و احتمالاً از نظر باکتری‌های همزیست با ریشه نخود غنی‌تر بوده است. دمای هوا و بارش از مهم‌ترین متغیرهای محیطی مؤثر بر عملکرد محصول در زراعت دیم محسوب می‌شود. میانگین دمای هوا در سال اجرای آزمایش در مراغه و بوکان به‌ترتیب برابر ۷/۲ و ۸/۸ درجه سانتی‌گراد و مجموع بارش در مراغه و بوکان به‌ترتیب برابر ۳۸۱/۴ و ۲۸۹/۰ میلی‌متر بود (جدول ۲). با وجود مجموع بارش کمتر بوکان نسبت به مراغه، میانگین دمای بالاتر بوکان احتمالاً موجب بهبود فعالیت‌های متابولیکی گیاه و کارآیی بالاتر جذب آب و عناصر غذایی شده است. علاوه‌بر آن، توزیع بارندگی در منطقه بوکان احتمالاً از وضعیت مطلوب‌تری نسبت به مراغه برخوردار بوده است. در زراعت دیم، تعادل بین دما و بارش و توزیع بارش (نه صرفاً مقدار بارش) عامل کلیدی در تعیین عملکرد گیاه محسوب می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به بافت سنگین خاک مراغه (Clay loam)، ممکن است که بارش بیش‌ازحد مراغه با ایجاد شرایط غرقابی موقت، دسترسی ریشه به اکسیژن را محدود کرده باشد.

ارتفاع بوته

ارتفاع بوته در کشت پاییزی بوکان به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشت پاییزی و بهاره مراغه بود و در مراغه بین کشت پاییزی و بهاره تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. با افزایش سطح کود نیتروژن، ارتفاع بوته ابتدا افزایش یافته و بعد از رسیدن به یک حد بیشینه، با افزایش مقدار کود نیتروژن، ارتفاع بوته کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع بوته (۵۷ سانتی‌متر) از سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره در بوکان به دست آمد که شش سانتی‌متر بیشتر از شاهد (سطح صفر کود نیتروژن) بود. در کشت بهاره مراغه نیز بیشترین ارتفاع بوته در سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره مشاهده شد که چهار سانتی‌متر بیشتر از شاهد بود، امّا در کشت پاییزی مراغه بیشترین ارتفاع بوته به سطح ۷۵ کیلوگرم در هکتار اوره مربوط بود که نسبت به شاهد سه سانتی‌متر بیشتر بود (جدول ۴). کاربرد مقدار کافی کود نیتروژن در ابتدای فصل رشد به‌عنوان آغازگر، سبب استقرار سریع‌تر نخود در مزرعه شده و با افزایش رشد رویشی، ارتفاع گیاه افزایش می‌یابد (Amiri et al., 2015).

وزن ۱۰۰ دانه

وزن ۱۰۰ دانه نخود، شاخصی از میزان درشتی دانه بوده و در مرغوبیت و بازارپسندی محصول مؤثر است. هرچه وزن ۱۰۰ دانه بیشتر باشد، میزان درشتی دانه بیشتر است. نتایج نشان داد که وزن ۱۰۰ دانه نخود در سه محیط تفاوت معنی‌داری نسبت به یکدیگر نداشتند، ولی با افزایش سطح کود نیتروژن، وزن ۱۰۰ دانه ابتدا افزایش یافت و با افزایش مقدار کود نیتروژن به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، وزن ۱۰۰ دانه کاهش یافت، به‌طوری‌که وزن ۱۰۰ دانه در شاهد و سطح ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن کمتر از سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوگرم کود نیتروژن بود (جدول ۴). داشادی و رسایی (Dashadi & Rasaei, 2020) بیشترین وزن ۱۰۰ دانه را با مصرف ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آوردند. امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) نیز بیشترین و کم‌ترین وزن ۱۰۰ دانه را در شرایط آبیاری، به‌ترتیب با مصرف ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آوردند. با افزایش کود نیتروژن، ارتفاع و شاخ و برگ گیاه (ساختارهای فتوسنتزکننده) افزایش یافته و با اختصاص بخشی از مواد فتوسنتزی به دانه، وزن ۱۰۰ دانه افزایش می‌یابد (Roesti et al., 2006). در واقع، با کاربرد سطح متعادلی از کود نیتروژن، گیاه با رشد رویشی مناسبی وارد مرحله زایشی شده و با حمایت مناسب اندام‌های زایشی، به‌ویژه غلاف‌های در حال پر شدن، وزن دانه‌ها افزایش می‌یابد. بااین‌حال، مصرف مقادیر زیاد نیتروژن می‌تواند وزن ۱۰۰ دانه را کاهش دهد. جات و همکاران (Jat et al., 2021) گزارش کردند که کاربرد ۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، وزن ۱۰۰ دانه نخود را از ۲۲ به ۲۵/۵ گرم افزایش داد.

عملکرد زیستی و عملکرد دانه

تغییرات عملکرد زیستی و عملکرد دانه تحت‌تأثیر سطوح مختلف کود اوره تقریباً مشابه هم بود. با افزایش عملکرد زیستی، گیاه با تاج‌پوشش بزرگ‌تر قادر است که مخزن زایشی بزرگ‌تری را تغذیه کرده و به‌میزان کافی ماده خشک به آن اختصاص دهد، در نتیجه عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد (Amiri et al., 2015). عملکرد زیستی و عملکرد دانه در کشت پاییزی بوکان به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشت پاییزی و بهاره مراغه بود (جدول ۴). خاک مزرعه مورد مطالعه در بوکان دارای pH کمتر و ماده آلی و فسفر و پتاسیم قابل استفاده بیشتری نسبت به مراغه بود (جدول ۱). بنابراین، از حاصلخیزی بیشتری برخوردار بود. همچنین به‌طور مداوم تحت تناوب گندم-نخود قرار داشته و احتمالاً از نظر باکتری‌های همزیست با ریشه نخود

غنی‌تر بود. علاوه‌بر آن، نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی منطقه بوکان نسبت به مراغه برای کشت نخود مناسب‌تر بوده و میانگین عملکرد نخود در بوکان بیشتر از مراغه می‌باشد. میانگین دمای هوا در سال اجرای آزمایش در مراغه (۷/۲ درجه سانتی‌گراد) کمتر از بوکان (۸/۸ درجه سانتی‌گراد)، ولی مجموع بارش در مراغه (۳۸۱/۴ میلی‌متر) بیشتر از بوکان (۲۸۹/۰ میلی‌متر) بود (جدول ۲). با وجود مجموع بارش کمتر بوکان نسبت به مراغه، میانگین دمای بالاتر بوکان و احتمالاً توزیع مناسب بارندگی بین فصول سال فعالیت‌های متابولیکی گیاه را افزایش داده و موجب بهبود کارآیی جذب آب و عناصر غذایی شده است. علاوه‌بر آن، خاک مراغه به‌علت بافت سنگین‌تر (Clay loam) و ساختمان متراکم‌تر نسبت به خاک بوکان (Silty loam)، استعداد بیشتری به غرقاب‌شدگی داشته و با توجه به حساسیت زیاد نخود به شرایط غرقاب، ممکن است بارش بیش‌ازحد مراغه با ایجاد شرایط غرقابی موقت، دسترسی ریشه به اکسیژن را محدود کرده باشد. عملکرد دانه در کشت پاییزی و بهاره نخود در مراغه در تمام سطوح نیتروژن، به‌طور معنی‌داری کمتر از کشت پاییزی بوکان بود که نشان می‌دهد محیط می‌تواند شدیدتر از کود، عملکرد محصول را تحت‌تأثیر قرار دهد. در کشت پاییزی بوکان با مصرف ۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، امّا با افزایش بیشتر مقدار کود نیتروژن، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد دانه مشاهده نشد. در کشت پاییزی و بهاری مراغه به‌ترتیب با افزایش کود اوره تا ۷۵ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه افزایش یافت، امّا با افزایش میزان کود مصرفی، عملکرد دانه کاهش یافت. به عبارت دیگر، بیشترین عملکرد دانه در کشت پاییزی و بهاری مراغه در سطح ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار مشاهده شد. سینگ و همکاران (Singh et al., 2019) گزارش کردند که مصرف ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، عملکرد دانه نخود را تا ۷۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش داد، امّا سطوح بالای نیتروژن (بیش از ۶۰ کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه را به‌دلیل ایجاد تنش شوری و بیماری‌های قارچی تا ۲۰-۱۵ درصد کاهش داد.

با توجه به اینکه گیاه نخود می‌تولند بخش زیادی از نیاز نیتروژنی خود را از طریق تثبیت زیستی تأمین کند، برخلاف گیاهانی مانند غلات کود نیتروژن زیادی نیاز ندارد. بااین‌حال، مقادیری از کود نیتروژن که بتواند تا زمان استقرار گیاه و برقراری رابطه همزیستی نیاز نیتروژنی گیاه را تأمین کند، مورد نیاز می‌باشد. از طرف دیگر، کود نیتروژن زیاد به‌علت ایجاد شوری و سمیت و اثرات بازدارنده برای رابطه همزیستی، منجر به افزایش عملکرد نخواهد شد. بنابراین با وجود اینکه استفاده از مقادیر ناچیزی از کود نیتروژن می‌تواند اثرات مثبتی بر عملکرد داشته باشد، امّا مصرف مقادیر بیش از حد نیتروژن اثرات مثبتی نداشته و حتی ممکن است که در برخی موارد، اثرات منفی بر عملکرد نیز داشته باشد. به‌عنوان مثال، امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) نشان دادند که بیشترین عملکرد دانه نخود در شرایط آبیاری کامل به‌طور مشترک با مصرف ۳۰ و ۷۵ کیلوگرم اوره در هکتار حاصل شد، درحالی‌که کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، عملکرد دانه را به‌طور معنی‌دار کاهش داد. آنان بیان کردند که مقادیر زیاد کود نیتروژن می‌تواند با افزایش رشد رویشی و تخلیه رطوبتی خاک از یک سو و افزایش فشار اسمزی از سوی دیگر، تنش خشکی در گیاه را تشدید کند.

داشادی و رسایی (Dashadi & Rasaei, 2020) با بررسی اثر سه سطح صفر، ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار بر عملکرد نخود (رقم‌های عادل و آرمان) در کرمانشاه گزارش کردند که بیشترین عملکرد هر دو رقم در مقدار ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آمد، ولی عملکرد دانه در دو سطح ۲۵ و ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت. ملکی و همکاران (Malaki et al., 2021) گزارش کردند که مصرف ۳۰ کیلوگرم اوره در هکتار عملکرد دانه، وزن ۱۰۰ دانه و شاخص برداشت را به‌طور معنی‌داری افزایش داد.

شاخص برداشت

شاخص برداشت در بین تیمارهای مختلف در سه محیط مورد بررسی تفاوت چندانی نداشت، امّا بیشترین مقدار آن (۴۸ درصد) در سطح ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار در کشت بهاره مراغه مشاهده شد. استفاده از کود نیتروژن در ابتدای فصل رشد به‌عنوان کود آغازگر، نیتروژن مورد نیاز گیاه قبل از تشکیل رابطه همزیستی مؤثر با *ریزوبیوم‌ها* را تأمین کرده و منجر به استقرار سریع‌تر نخود در مزرعه شده و رشد رویشی آن را افزایش داد. با افزایش رشد رویشی، عملکرد زیستی افزایش یافته و به‌علت افزایش سطح فتوسنتزکننده، مواد فتوسنتزی نیز افزایش یافته و عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، درصورتی‌که کود نیتروژن بیش از اندازه مصرف نشود و عملکرد زیستی را در مقایسه با عملکرد دانه افزایش ندهد، کاربرد کود نیتروژن منجر به افزایش شاخص برداشت خواهد شد (Surrenson, 1999). به‌عنوان مثال، امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) گزارش کردند که بیشترین عملکرد دانه نخود در شرایط آبیاری کامل با مصرف ۳۰ و ۷۵ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آمد، درحالی‌که بیشترین عملکرد زیستی با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژنی در هکتار حاصل شد که نشان

می‌دهد با افزایش کود نیتروژن به ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد زیستی در مقایسه با عملکرد دانه بیشتر افزایش یافته است. آنان بیشترین و کم‌ترین شاخص برداشت را در شرایط آبیاری به‌ترتیب با مصرف ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژنی به دست آوردند.

بهره‌وری آب باران

با توجه به اینکه بهره‌وری آب باران تابعی از عملکرد دانه است، تغییراتی مشابه با تغییرات عملکرد دانه نشان داد، به‌طوری‌که کشت پاییزی بوکان نسبت به کشت پاییزی و بهاره مراغه بهره‌وری بیشتری داشت. بهره‌وری آب باران که رابطه مستقیم با عملکرد و رابطه عکس با میزان بارندگی دارد، با افزایش عملکرد افزایش و با افزایش بارندگی کاهش می‌یابد. مجموع بارش در مراغه (۳۸۱/۴ میلی‌متر) بیشتر از بوکان (۲۸۹/۰ میلی‌متر) بود (جدول ۲)، ولی عملکرد دانه در بوکان (۱۴۶۸ کیلوگرم در هکتار) بیشتر از کشت پاییزی (۸۴۰ کیلوگرم در هکتار) و بهاره (۶۸۳ کیلوگرم در هکتار) مراغه بود (جدول ۴). علاوه‌بر آن، خاک منطقه بوکان دارای میزان ماده آلی بیشتری بود که می‌تواند با افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، کارآیی آب باران را افزایش دهد. بنابراین، بهره‌وری بیشتر در بوکان نسبت به مراغه قابل انتظار بود. با افزایش سطح کود نیتروژن، بهره‌وری آب باران ابتدا افزایش و در مقادیر بیشتر کود نیتروژن، کاهش یافت (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری نخود دیم در سه محیط

Table 4- Mean comparison of different nitrogen fertilizer effects on yield, yield components, and productivity indices of rainfed chickpea in three environments

محیط Environment	اوره (کیلوگرم بر هکتار) Urea (kg.ha^{-1})	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	وزن ریشه خشک (گرم به ازای یک گیاه) Root dry weight (g.plant^{-1})	حجم ریشه (سانتی‌مترمکعب به ازای یک گیاه) Root volume (cm^3.plant^{-1})	وزن گره ریشه (گرم به ازای یک گیاه) Root nod weight (g.plant^{-1})	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)
مراغه (کشت بهاره) Maragheh (spring planting)	0	42h*	1.22e-g	2.84fg	1.29g	26g-i
	25	44gh	1.21fg	2.70fg	1.26gh	27f-i
	50	46fg	1.46d-f	3.11ef	0.89i	26hi
	75	44f-h	1.26e-g	3.05e-g	0.48j	24i
	100	43gh	1.07g	2.78fg	0.43j	20j
مراغه (کشت پاییزی) Maragheh (autumn planting)	0	44gh	1.68cd	4.12d	1.80f	30ef
	25	44f-h	1.77c	4.38d	2.46d	30e-g
	50	45fg	1.43d-f	3.14ef	2.15e	31e
	75	47ef	1.47ef	3.48e	1.78f	29e-h
	100	44gh	1.11g	2.44g	1.00hi	28e-h
بوکان (کشت پاییزی) Bukan (autumn planting)	0	51cd	2.59a	8.40a	3.55a	60a
	25	49de	2.43a	7.75b	3.25b	51b
	50	57a	2.57a	7.86ab	3.17b	47bc
	75	54b	2.53a	7.72b	2.83c	46c
	100	53bc	2.09b	6.23c	2.71f	37d

* حروف غیرمشابه در هر ستون نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن با استفاده از تجزیه مرکب داده‌های سه محیط می‌باشد.

* Means with different letters within a column are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test based on combined analysis of data from three environments.

ادامه جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری نخود دیم در سه محیط

Table 4- Mean comparison of different nitrogen fertilizer effects on yield, yield components, and productivity indices of rainfed chickpea in three environments, continued

محیط Environment	اوره (کیلوگرم بر هکتار) Urea (kg.ha^{-1})	بهره‌وری آب باران (کیلوگرم بر میلی‌متر) Rainwater productivity (kg.mm^{-1})	شاخص برداشت (درصد) Harvest index (%)	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) Grain yield (kg.ha^{-1})	عملکرد زیستی (کیلوگرم بر هکتار) Biological yield (kg.ha^{-1})	وزن ۱۰۰ دانه (گرم) Weight of one hundred grains (g)
مراغه (کشت بهاره) Maragheh (spring planting)	0	1.61g*	43cd	617g	1435hi	34d-f
	25	2.07de	46ab	793de	1714e-g	35a-f
	50	2.30cd	48a	885cd	1830ef	35a-f
	75	1.68fg	41e	644fg	1581gh	35a-f
	100	1.24h	37f	477h	1281i	34ef
مراغه (کشت پاییزی) Maragheh (autumn planting)	0	1.83e-g	45bc	703e-g	1557gh	35b-f
	25	1.98d-f	45bc	763d-f	1688fg	36a-c
	50	2.51c	44bc	963c	2203d	37a
	75	2.51c	44bc	965c	2189d	36a-e
	100	2.09de	41de	804de	1940e	34f
بوکان (کشت پاییزی) Bukan (autumn planting)	0	3.36b	45bc	1344b	2984c	36a-f
	25	3.7a	45a-c	1478a	3250b	36a-d
	50	3.86a	44bc	1542a	3513a	35c-f
	75	3.75a	41de	1499a	3652a	37ab
	100	3.7a	42de	1479a	3558a	36a-f

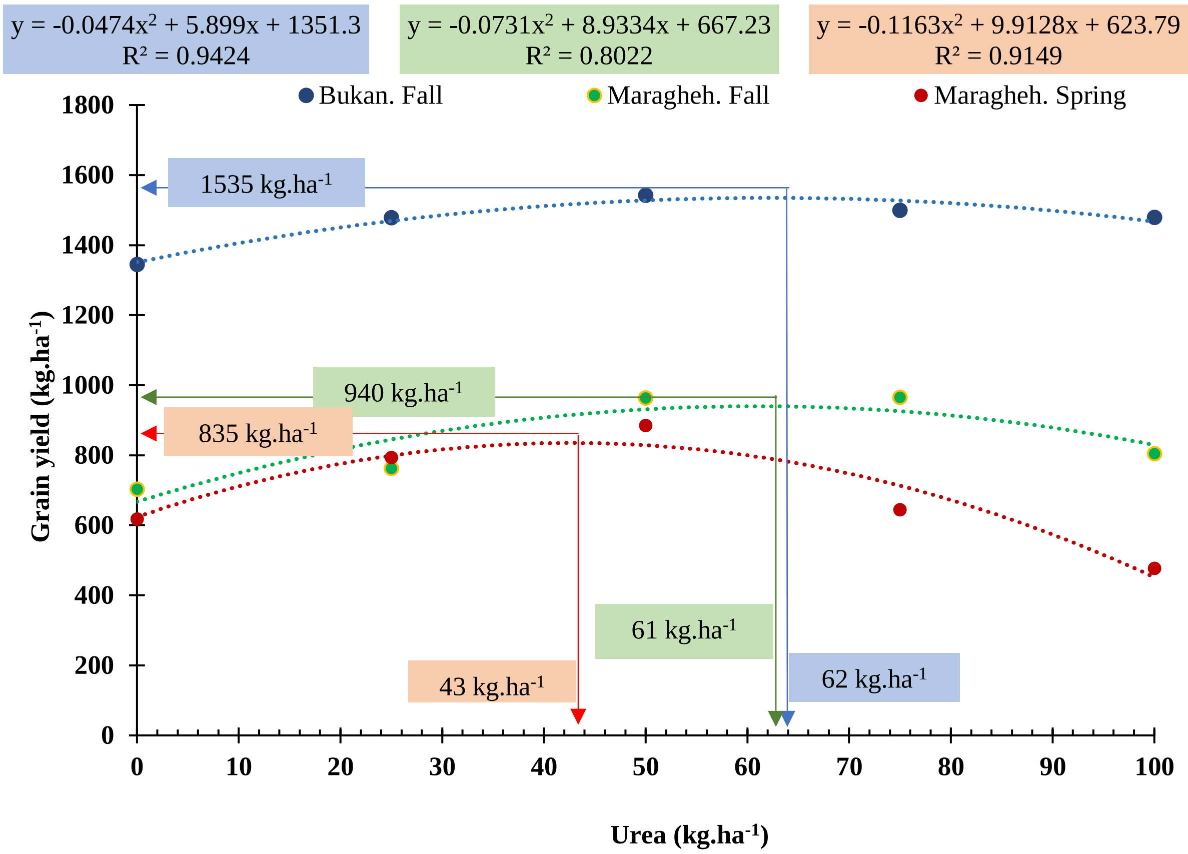
* حروف غیرمشابه در هر ستون نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن با استفاده از تجزیه مرکب داده‌های سه محیط می‌باشد.

* Means with different letters within a column are significantly different at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test based on combined analysis of data from three environments.

تعیین نیاز نیتروژنی و توصیه کودی نخود

بررسی روابط رگرسیونی بین عملکرد دانه و سطوح کود اوره مورد استفاده نشان داد که بیشترین عملکرد دانه قابل دستیابی در کشت پاییزی نخود دیم در منطقه بوکان و مراغه به‌ترتیب برابر با ۱۵۳۵ و ۹۴۰ کیلوگرم در هکتار بود و برای دستیابی به این عملکردها در منطقه بوکان و مراغه به‌ترتیب به ۶۲ و ۶۱ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان کود آغازگر نیاز است. بیشترین عملکرد دانه قابل دستیابی در کشت بهاره نخود در مراغه ۸۳۵ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد که مقدار کود اوره مورد نیاز برای دستیابی به این عملکرد ۴۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد (شکل ۱). بنابراین، با توجه به حداکثر عملکرد قابل دستیابی به‌دست‌آمده از روابط رگرسیونی، اختلاف حداکثر عملکرد دلنه در کشت پاییزه و بهاره حدود ۱۰۵ کیلوگرم در هکتار (۱۳ درصد) می‌باشد، درحالی که میزان کود اوره مورد نیاز در کشت پاییزه ۱۸ کیلوگرم در هکتار (۴۲ درصد) بیشتر از کشت بهاره است.

با استفاده از مدل‌های رگرسیونی ارائه‌شده در شکل ۲ می‌توان میزان کود اوره لازم برای دستیابی به مقدار مشخصی از عملکرد مورد نظر و یا حداکثر عملکرد مورد انتظار حاصل از به کار بردن مقدار مشخصی کود اوره را با اطمینان قابل قبولی تخمین زد. بااین‌حال، معمولاً به‌علت ملاحظات زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های مصرف کود، به‌جای حداکثر عملکرد، مقدار کود لازم برای دستیابی به ۹۰ درصد عملکرد حداکثر محاسبه و توصیه می‌شود، امّا با در نظر گرفتن هزینه مصرف کود و ارزش اقتصادی محصول تولیدشده، می‌توان بهینه‌ترین مقدار کود برای دستیابی به بیشترین سود اقتصادی را محاسبه و توصیه کرد.



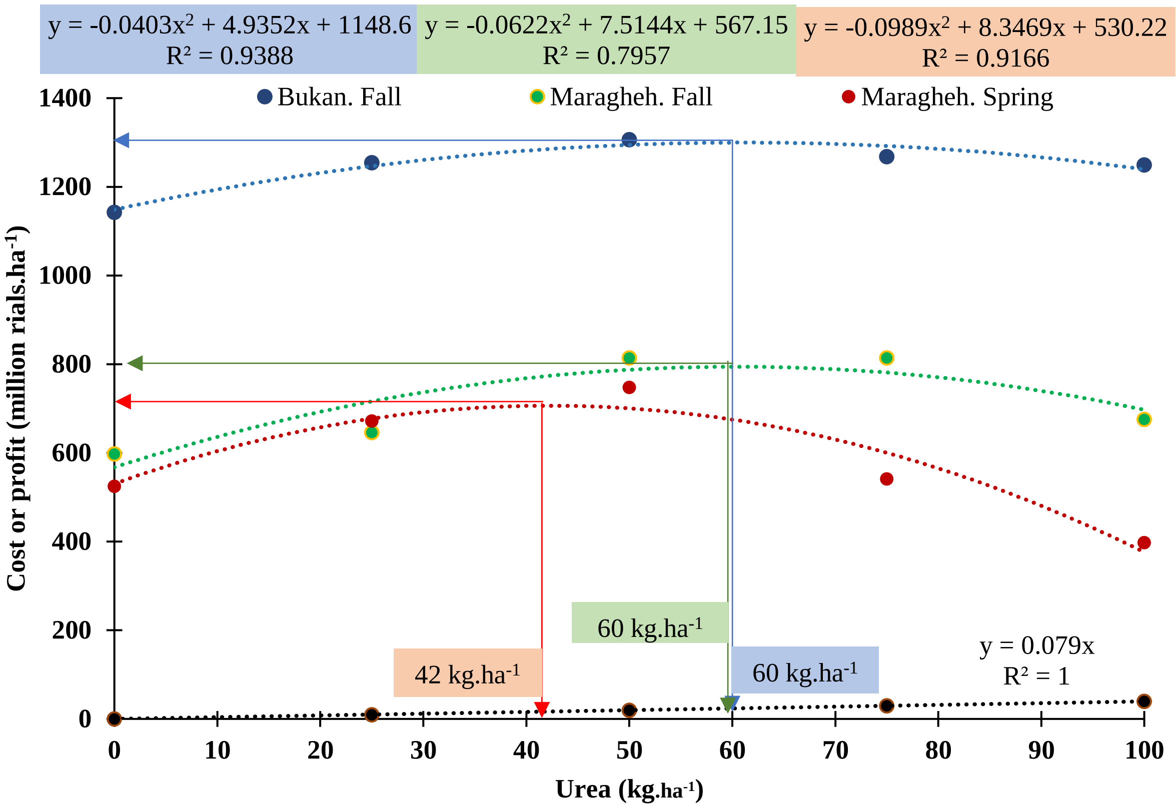
شکل ۱- روابط رگرسیونی بین عملکرد دانه نخود دیم و سطوح مختلف کود اوره در سه محیط

Figure 1- Regression relationships between grain yield of rainfed chickpea and different levels of urea fertilizer in three environments

شکل ۲، روابط رگرسیونی بین ارزش اقتصادی کود مورد استفاده و محصول تولیدشده را نشان می‌دهد. با استفاده از این روابط رگرسیونی، کمترین مقدار کود اوره مورد نیاز برای دستیابی به بیشترین سود اقتصادی (دوز بهینه اقتصادی) حاصل از کشت پاییزی نخود دیم در بوکان و مراغه ۶۰ کیلوگرم در هکتار به دست آمد، درحالی‌که این مقدار برای کشت بهاره در مراغه ۴۲ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۲). بنابراین، برای دستیابی به بیشترین سود اقتصادی حاصل از کشت پاییزه نخود (رقم آنا) در مناطق سرد و معتدل مانند بوکان و مراغه، مقدار ۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار و برای کشت بهاره نخود مقدار ۴۲ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان کود آغازگر توصیه می‌شود.

روابط همبستگی

بررسی روابط همبستگی ساده بین عملکرد دانه و اجزای عملکرد نشان داد که عملکرد دانه بیشترین همبستگی مثبت را به‌ترتیب با عملکرد زیستی، ارتفاع بوته و وزن ریشه خشک داشت (جدول ۵). بهره‌وری آب باران نیز بیشترین همبستگی مثبت را به‌ترتیب با عملکرد دانه، عملکرد زیستی و ارتفاع بوته داشت. وجود همبستگی زیاد بین عملکرد دانه و صفات ذکرشده نشان می‌دهد که این صفات احتمالاً به‌طور مستقیم بر عملکرد دانه تأثیر دارند و یا ممکن است عواملی که منجر به افزایش ارتفاع بوته می‌شوند، عملکرد زیستی و به‌تبع آن، عملکرد دانه را نیز افزایش داده‌اند.



شکل ۲- روابط رگرسیونی بین سطوح مختلف کود اوره و سود حاصل از کاربرد آن‌ها و رابطه خطی بین سطوح مختلف کود اوره و هزینه کاربرد آن

Figure 2 - Regression relationships between different levels of urea fertilizer and the benefits of their application and linear relationship between different levels of urea fertilizer and the cost of its application

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین عملکرد و اجزای عملکرد نخود دیم تحت‌تأثیر سطوح مختلف کود اوره در ۳ محیط

Table 5- Correlations between yield and yield components of rainfed chickpea affected by different levels of urea fertilizer in 3 environments

	طول ریشه Root length	وزن گره ریشه Root nod weight	ارتفاع بوته Plant height	وزن ریشه خشک Dry root weight	عملکرد زیستی Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	بهره‌وری باران Rain productivity
طول ریشه Root length	1.00						
وزن گره ریشه Root nod weight	0.91**	1.00					
ارتفاع بوته Plant height	0.77**	0.68**	1.00				
وزن ریشه خشک Dry root weight	0.93**	0.90**	0.88**	1.00			
عملکرد زیستی Biological yield	0.83**	0.74**	0.94**	0.88**	1.00		
عملکرد دانه Grain yield	0.86**	0.79**	0.93**	0.90**	0.99**	1.00	
بهره‌وری باران Rain productivity	0.85**	0.79**	0.93**	0.90**	0.99**	1.00**	1.00

**: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

**: significant at 1% probability level

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که تمامی شاخص‌های رشدی شامل طول، حجم و وزن گره‌های ریشه، وزن ریشه خشک، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی و عملکرد دانه در کشت پاییزی بوکان به‌طور معنی‌داری بیشتر از کشت‌های بهاره و پاییزی مراغه بود. این برتری را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که مهم‌ترین آن‌ها تفاوت‌های اقلیمی و خاکی بین دو منطقه بود. اگرچه مجموع بارندگی بوکان (۲۸۹ میلی‌متر) کمتر از مراغه (۳۸۱ میلی‌متر) بود، امّا میانگین دمای بالاتر (۸/۸ درجه سانتی‌گراد در مقابل ۷/۲ درجه سانتی‌گراد) و احتمالاً توزیع مناسب‌تر بارش‌ها در بوکان، شرایط بهینه‌تری برای رشد گیاه ایجاد کرده است. از سوی دیگر، خاک منطقه بوکان با دارا بودن pH کمتر، مقدار بیشتر ماده آلی و فسفر و پتاسیم قابل استفاده بیشتر و همچنین بافت متوسط و تناوب کشت مناسب (گندم-نخود)، احتمالاً دارای باکتری‌های همزیست مؤثر بیشتری بوده و از حاصلخیزی بیشتری برخوردار بوده است. در مقابل، بافت سنگین خاک مراغه همراه با بارش بیشتر از یک سو و حساسیت نخود به غرقاب و تهویه از سوی دیگر، ممکن است باعث ایجاد شرایط غرقابی موقت و ایجاد محدودیت دسترسی ریشه به اکسیژن شده باشد. در مورد تأثیر سطوح مختلف کود نیتروژن، نتایج نشان داد که افزایش مصرف کود تا سطوح مشخصی (۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار برای بوکان و ۵۰-۷۵ کیلوگرم برای مراغه) موجب بهبود عملکرد شد، امّا مصرف بیش از این مقادیر نه‌تنها اثر مثبتی نداشت، بلکه در برخی موارد منجر به کاهش عملکرد گردید. براساس این یافته‌ها، برای دستیابی به حداکثر سود اقتصادی در کشت پاییزه نخود دیم رقم آنا، مصرف ۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار برای بوکان و مراغه و برای کشت بهاره مقدار ۴۲ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان کود آغازگر توصیه می‌شود.

References

Amiri, S., Parsa, M., Bannayan, M., Nassiri Mahallati, M., & Deihimfard, R. (2015). Effect of irrigation and nitrogen fertilizer levels on yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under Mashhad climatic conditions. *Iranian Journal Pulses Research*, *6*(1), 66-77. (in Persian with English Abstract). https://doi.org/10.22067/ijpr.v1394i1.25660

Bhattacharyya, S., Rana, M., & Kumar, A. (2020). Enhancing rhizobial symbiosis and soil health through balanced nitrogen fertilization in chickpea cultivation. *Applied Soil Ecology*, *156*, 103697.

Dane, J. H., & Topp, C. G. (Eds.). (2020). *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. John Wiley & Sons.

Dashadi, M., & Rasaei, A. (2020). Investigation of different levels of molybdenum and nitrogen on yield and yield components of chickpea cultivars. *Crop Physiology*, *12*(2(46)), 81-96. (in Persian with English Abstract).

Hassanpoor, E. (2023). Investigation of growth analysis and yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress and nitrogen fertilizer. *Iranian Journal of Plant & Biotechnology*, *18*(1), 75-96. (in Persian with English Abstract)

Jat, S. K., Kumar, R., & Meena, V. S. (2021). Optimizing nitrogen levels for seed weight and protein content in rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Plant Nutrition*, *44*(15), 2200-2215.

Malaki, A., Khalesro, S., & Heidari, G. R. (2021). Evaluation of quantitative and qualitative traits of chickpea as affected by biofertilizer, nitrogen, and humic acid in dryland condition. *Journal of Crop Production and Processing*, *11*(1), 83-94. (in Persian with English Abstract). https://doi.org/10.47176/jcpp.11.1.35941

Meena, H., Sharma, P., & Yadav, S. (2020). Nitrogen-mediated drought tolerance in rainfed chickpea: Physiological and agronomic perspectives. *Agricultural Water Management*, *240*, 106245.

Namvar, A., Seyed Sharifi, R., & Khandan, T. (2011). Growth analysis and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in relation to organic and inorganic nitrogen fertilization. *Ekologija*, *57*(3), 97-108.

Raftari, E., Nakhzari Moghaddam, A., Mollashahi, M., & Gholamalipour Alamdari, E. (2024). The effect of nitrogen fertilizer application and planting pattern on yield and competition indices of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*). *Iranian Journal Pulses Research*, *15*(2), 265-278. (in Persian with English Abstract). https://doi.org/10.22067/ijpr.2024.86819.1083

Rana, M., Meena, H., & Kumar, A. (2021). Impact of nitrogen regimes on soil microbiome in chickpea-based cropping systems. *Applied Soil Ecology*, *34*(1), 78-89.

Roesti, D., Gaur, R., Johri, B. N., Imfeld, G., Sharma, S., Kawaljeet, K., & Aragno, M. (2006). Plant growth stage, fertilizer management and bioinoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria affect the rhizobacterial community structure in rainfed wheat fields. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*, 1111-1120. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.010

Sabaghpour, H., Mahmoudi, A. A., Saeed, A., Kamel, M., & Malthora, R. S. (2006). Study on chickpea drought tolerance lines under dryland condition of Iran. *Indian Journal of Crop Science*, *1*, 70-73.

Sharma, P., Yadav, D., & Dwivedi, R. (2017). Optimizing nitrogen for drought resistance in rainfed chickpea cultivation. *Agricultural Water Management*, *189*, 55-67.

Singh, A., Sharma, B., & Patel, C. (2019). Effects of nitrogen levels on growth and yield of rainfed chickpea. *Journal of Agronomy Research*, *12*(3), 45-60.

Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of Soil Analysis, part 3: Chemical Methods*. John Wiley & Sons.

Surrenson, G. (1999). Effect of plant genotype and nitrogen fertilizer on symbiotic nitrogen fixation by legume cultivar. *Plant and Soil*, *72*, 1049-1056.

Tallie, A. A., & Sayadyan, K. (2000). Effect of supplementary irrigation and nutrition requirement of chickpea in dryland. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *2*(3), 63-70. (in Persian with English Abstract) https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1379.2.3.6.7

Walley, F. L., Boahen, S. G., Hnatowich, K., & Stevenson, C. (2005). Nitrogen and phosphorus fertility management for desi and kabuli chickpea. *Canadian Journal of Plant Science*, *85*, 73-79. https://doi.org/10.4141/P04-039